

# 磁场对液态金属流的制动效应<sup>1)</sup>

荣 升

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

**摘要** 研究在静磁场作用下, 连铸坯中液态金属的流动, 建立了二维数学模型并考虑了湍流的影响. 采用数值分析方法分析了磁场对液态金属流股的制动效应. 计算结果说明静磁场可以有效地减小流股速度并使其分散, 同时使上升到液态金属液面的反转流减弱. 随着哈特曼数增高和雷诺数的减小, 磁场的制动效应增强.

**关键词** 液态金属, 连铸坯, 电磁制动

## 引 言

在冶金工业中, 随着对高品质的金属板如钢板的需求增加, 迫切要求提高板坯浇注速度以增加产量并减小非金属夹杂物与气泡等内部缺陷进而提高板坯质量. 然而凝固壳腐蚀和内部夹杂物聚集的增加, 严重制约了浇注速度的提高. 凝固壳腐蚀和板坯内部缺陷的出现与坯中液态金属流动结构密切相关. 自浸入式水口侧孔流入的液态金属射流(流股)携带着非金属夹杂物和气泡, 冲向坯的窄面. 当浇注速度提高时, 在撞击点附近, 凝固壳再次熔化, 出现裂纹或破坏; 由于浇注速度提高, 流股速度超过流股下方坯中一些夹杂物上浮速度, 这些夹杂物的上浮将被高速流股所阻断; 同时沿窄面上升的反转流加强, 导致弯月面波动, 使保护渣易于卷入, 从而使板坯内部夹杂物大量增加. 为了提高浇注速度和减小板坯中缺陷, 必须减小流股速度并且改变坯中流动结构. 80 年代初期, 日本川崎公司和瑞典 ASEA 公司联合开发了板坯连铸结晶器电磁制动技术(EMBR)并在钢厂进行了实验, 取得了良好冶金效果<sup>[1]</sup>. 80 年代末期川崎公司等开始了坯内流动和传热的理论研究<sup>[2~5]</sup>, 90 年代初, 我国进行了低熔点合金的电磁制动模拟实验<sup>[6]</sup>, 取得了减小流股速度的明显效果. 目前电磁制动已成为控制高速板坯连铸中液态金属流动的重要手段. 为了更合理更有效地设计和使用电磁制动系统, 详细分析坯内液态金属流动是十分必要了. 本文研究了磁场作用下, 坯内液态金属流动, 建立了二维数学模型, 使用交错网格<sup>[7]</sup>, 采用数值分析, 分析了板坯内静磁场作用下的二维液态金属流动并考虑湍流的影响. 计算结果说明外加静磁场不仅可以有效地减少流股速度达 50% 以上, 而且改变坯中液态金属流动结构, 使流股分散和反转流减弱. 随着磁场增强, 哈特曼数增大, 制动效果加强; 随着浇注速度提高, 雷诺数增大, 制动效果减弱.

## 1 二维液态金属流动的数学模型

在具有电磁制动系统的板坯结构中, 坯外安装冷凝用的结晶器. 液态金属从浸

<sup>1)</sup> 国家自然科学基金资助项目.

1994-12-12 收到第一稿, 1995-03-31 收到修改稿.

入式水口两侧侧孔以速度  $V_0$  射入坯中, 形成两股射流, 我们称之为流股. 水口插入深度为  $h$ , 侧孔半径  $r$ , 倾角  $\alpha$ , 板坯宽度  $2a$ , 液态金属的液面——弯月面为自由面. 浇注速度  $V_c$ , 电磁制动系统由两对磁极、绕组以及两块软铁构成, 它们形成一个磁回路. 每对磁极产生垂直于流股速度的磁场, 磁通密度矢量为  $B$ . 基本假定如下: 流动为二维对称流动, 自由液面为水平面, 液态金属为不可压缩粘性流体, 运动粘性系数  $\nu$  和导电率  $\sigma$  均为常数, 忽略温度对流动的影响, 磁雷诺数很小.

液态金属流股流经垂直于它的磁场时, 在液态金属中产生感应电流  $J$ , 磁场与这个感生电流相互作用产生一个洛伦兹力作用于液态金属上, 因此在动量方程中增加了一个体积力  $J \times B$ . 重力与压力梯度合并考虑, 引入归一化压力  $P^*$ ,  $\rho \nabla P^* = \nabla p - \rho g$ ,  $p$ ,  $\rho$  为流体压力和密度,  $g$  为重力加速度矢量. 由于液态金属流动的雷诺数高, 故流动为湍流. 我们采用有效运动粘性系数  $\nu_e = \nu + \nu_t$ ,  $\nu_t$  为湍流运动粘性. 在小磁雷诺数条件下, 液态金属中磁场等于外加静磁场  $B$ , 不可压缩粘性液态金属满足以下磁流体力学方程组

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\nabla P^* + \nabla \cdot (\nu_e \nabla \mathbf{V}) + \mathbf{J} \times \mathbf{B} / \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (5)$$

其中  $\mathbf{E}$  为静电场强度矢量,  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量.

我们采用  $k-\varepsilon$  湍流模式, 它已成功地用于电磁搅拌产生的液态金属如钢水的湍流流动<sup>[8]</sup>, 其方程为

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) K^* = \nabla \cdot \left[ \left( \nu + C_k \frac{k^{*2}}{\varepsilon^*} \right) \nabla K^* \right] + G^* - \varepsilon^* \quad (6)$$

$$(\mathbf{V} \cdot \nabla) \varepsilon^* = \nabla \cdot \left[ \left( \nu + C_\varepsilon \frac{k^{*2}}{\varepsilon^*} \right) \nabla \varepsilon^* \right] + \frac{\varepsilon^*}{K^*} (C_1 G^* - C_2 \varepsilon^*) \quad (7)$$

其中二维  $G^* = \nu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right\}$ , 有效运动粘性系数  $\nu_e = \nu + \nu_t$ ,  $\nu_t$  为湍流运动粘性,  $\nu_t = C_\mu K^{*2} / \varepsilon^*$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $C_k = 0.09$ ,  $C_\varepsilon = 0.07$ .

选取直角坐标系  $\{xoy\}$ , 见图 1. 速度矢量  $\mathbf{V} = (u^*, v^*)$ , 电流密度矢量  $\mathbf{J} = (J_x^*, J_y^*)$ , 引入电位  $\varphi^*$ , 电场强度  $\mathbf{E} = -\nabla \varphi^*$ . 使用无量纲变量: 速度分量  $u, v$ ; 归一化压力  $p$ ; 磁通密度  $b$ ; 电位  $\varphi$ ; 湍流动能  $k$ ; 湍流耗损率  $\varepsilon$ ,  $G$  和坐标  $x, y$ . 相应的特征量为:  $V_c, V_c, V_{c2}, B_0, aB_0V_c, V_{c2}, V_{c3}/a, V_{c3}/a$  和  $a$ . 其中  $B_0$  为最大磁通密度. 从方程 (1)–(7) 导出无量纲方程组

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{M^2 b}{Re} \left( ub + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial v}{\partial y} \right] - \frac{M^2 b}{Re} \left( vb - \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{\partial vb}{\partial x} - \frac{\partial vb}{\partial y} \quad (11)$$

$$u \frac{\partial K}{\partial x} + v \frac{\partial K}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_K \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial K}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_K \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial K}{\partial y} \right] + G - \varepsilon \quad (12)$$

$$u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\varepsilon \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \left( \frac{1}{Re} + C_\varepsilon \frac{K^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] + \frac{\varepsilon}{K} (C_1 G - C_2 \varepsilon) \quad (13)$$

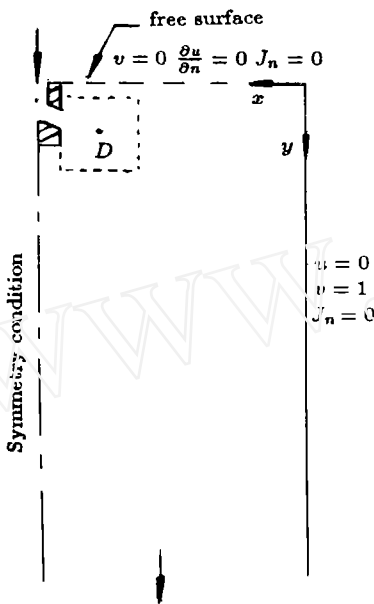


图 1 边界条件 (半坯)  
Fig.1 Boundary condition

由于对称, 我们仅考虑半坯内流动.

流场和电场应满足的无量纲边界条件见图 1. 在窄面上有自由滑移条件和电绝缘条件, 自由面上有自由滑移条件和电绝缘条件, 在中心线上有对称条件. 液态金属自水口侧孔流入坯中, 方向与水平面成倾角  $\alpha$ . 在液态金属流出的边界上, 法向电流密度的法向导数为零,  $u=0$  和  $v$  的法向导数为零, 表示坯中流动不受边界以外下游流动的影响.

采用实测磁通密度分布  $b$ . 在有效磁场制动区内: 一般情况下磁通密度  $b \leq 1$ , 均匀磁场情况  $b=1$ ; 在有效磁场制动区外  $b=0$ . 除板坯的几何参数 (包括倾角  $\alpha$ ) 以外, 无量纲方程组 (8)–(13) 和边条件中仅含两个独立的无量纲参数: 哈特曼数  $M = aB_0\sqrt{\sigma/\mu}$  和雷诺数  $Re = aV_c/\nu$ .

$M$  表示磁力相对粘性力的大小, 它与最大磁通密度  $B_0$ , 特征长度  $a$  以及液态金属性质  $\sqrt{\sigma/\mu}$  成正比.  $M=0$  表示无磁场. 雷诺数  $Re$  与浇铸速度  $V_c$  和特征长度  $a$  成正比, 与液态金属运动粘性  $\nu$  成反比. 对于给定的液态金属及坯的几何尺寸,  $M$  代表磁场的强弱,  $Re$  代表浇铸速度或流量的大小.

## 2 计算方法和结果

计算域为矩形 (水口除外), 长宽比为 8:1. 计算域划分成  $20 \times 150$  个均匀控制体. 在流股流经的区域和边界附近加密控制体. 采用自然网格和速度分量交错网格. 用控制容积法将方程 (8)–(13) 离散, 采用解压力耦合方程的半隐式方法<sup>[7]</sup> 求解离散化方程组.

取无量纲几何参数  $h/a = 0.24285$ ,  $r/a = 0.025714$ ,  $\alpha = -30^\circ$ ,  $Re = 8.33 \times 10^3$ ,  $1.39 \times 10^4$ ,  $2.78 \times 10^4$ ,  $M = 0, 760, 1140, 1520$  进行计算. 磁场中心位置用无量纲  $x, y$  坐标表示为:  $D(0.8, 0.1857)$ ,  $C(0.5857, 0.2929)$ ,  $A(0.5857, 0.3529)$ . 如果用某钢厂大型板坯连铸机的设计参数, 钢水特性:  $\rho = 7.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\sigma = 7.14 \times 10^5 / \Omega m$ ,

$\mu = 0.006 \text{ kg/m.s}$ , 上述  $M$  值表示最大磁通密度  $B_0 = 0, 0.1 \text{ T}, 0.15 \text{ T}, 0.2 \text{ T}$  和  $Re$  值表示浇铸速度  $V_c = 0.6036 \text{ m/min}, 1.006 \text{ m/min}, 2.012 \text{ m/min}$ .

一些典型的计算结果见图 2(a)~(f). 图 2(a) 为无磁场  $M = 0$  和  $Re = 1.39 \times 10^4$  时坯中液态金属二维流动的速度矢量图. 从图 2(a) 中看到, 自浸入式水口侧孔射入的液态金属流股以极高的速度冲向窄面, 在撞击点处流股向上和向下分岔, 在流股上方和下方各形成环流. 在外加磁场后, 坯中液态金

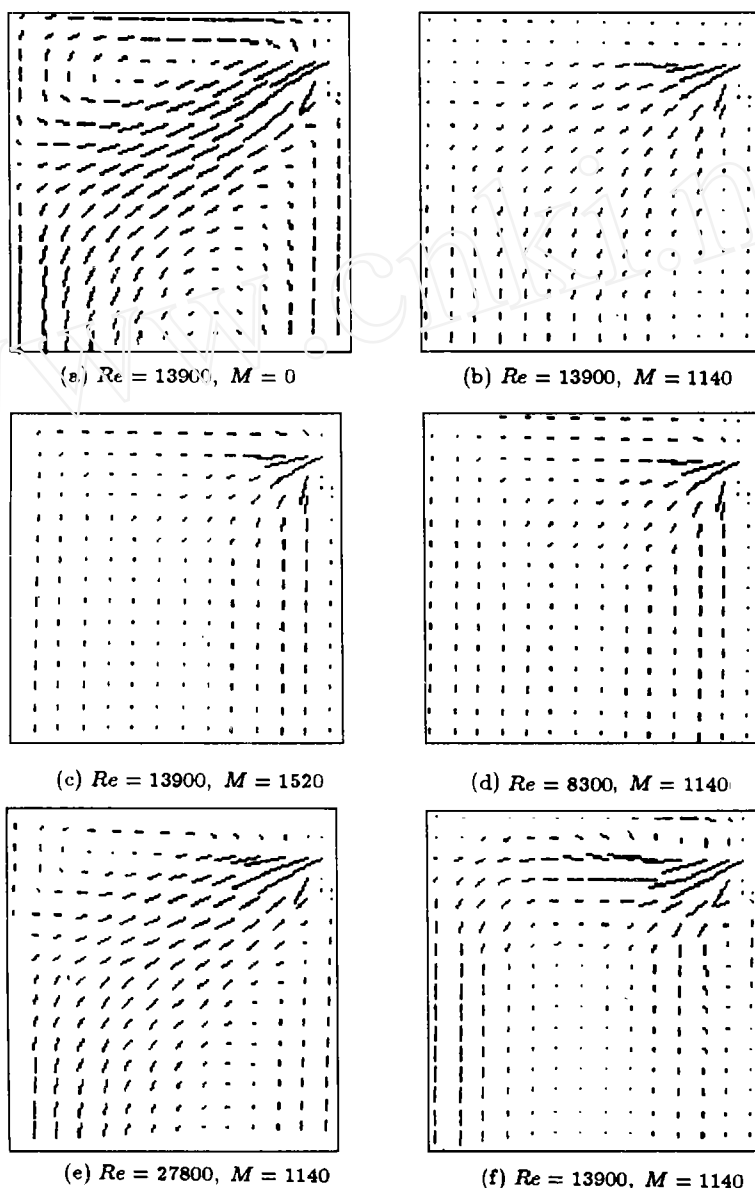


图 2 速度矢量图

Fig.2 Velocity vector

属流动的速度矢量图改变了, 见图 2(b) 和 (c)(其中磁场中心位置在  $D$  点). 液态金属流股在流经与之垂直的磁场时, 受到与其速度方向相反的电磁阻力作用, 因而流股减速并分散, 同时上升到弯月面的反转流亦减弱. 当磁场增强, 哈特曼数增大时, 流股更快地减速, 弯月面附近反转流亦迅速减弱, 其范围局限于水口附近, 磁场的位置对坯中液态金属流动亦有显著影响. 磁场中心在  $A$  点, 流股将绕过磁场向弯月面和水口下方分流, 见图 2(f). 当磁场增强,  $M$  加大时, 流股的分流趋势加剧. 若磁场中心  $A$  沿着  $y$  的负方向移近弯月面到  $C$  点时, 上升到弯月面的分流大大减弱. 若磁场中心向弯月面和水口靠近, 移至  $D$  点时, 计算结果表明在弯月面附近和水口下方的分流不见了, 但是当磁场太强时, 流股会向下严重偏斜, 使夹杂物粒子上浮受到限制<sup>[3]</sup>. 因此要选择最佳磁场强度和磁场位置. 浇铸速度或雷诺数的影响见图 2(b), (d) 和 (e), 随着  $Re$  提高,  $V_c$  增大, 流股减速变缓.

### 3 结 论

通过对以上计算结果的分析, 我们得到如下结论:

- 1) 静磁场与液态金属流股的相互作用有效地减小流股速度并使流股分散. 流股减速可达 50% 以上.
- 2) 静磁场的作用使上升到弯月面的反转流减弱, 范围缩小.
- 3) 当磁场强度增强, 哈特曼数增高时, 磁场对流股制动效应显著增强, 同时弯月面附近的反转流更迅速减弱和缩小范围. 磁场太强, 则流股向下严重偏斜.
- 4) 磁场位置对坯中液态金属流动和流股的制动亦有显著影响.
- 5) 为了获得有效流股制动效果和利于夹杂物上浮的流动结构, 要适当选择磁场强度和位置.
- 6) 当浇铸速度增加, 雷诺数提高时, 磁场对流股制动效应减弱.

**致谢** 对于黄永念教授和毛斌高级工程师给予的热情帮助, 在此表示衷心的感谢.

### 参 考 文 献

- 1 Jun Nagai et al. Steel flow control in a high-speed continuous slab caster using an electromagnetic Brake. *Iron and Steel Engineer*, 1984, 61(5): 41~47
- 2 Kouji TAKATAN et al. Analysis of heat transfer and fluid flow in the continuous casting mold with electromagnetic brake. *ISIJ International*, 1989, 29(12): 1063~1068
- 3 Hirokazu Tozawa, et al. Flow control of molten steel in continuous casting mold. In: Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, ISIJ, 1990. 438~445
- 4 奥田治老ら. 中炭域连铸ステップの表面性にはず及铸型内电磁プレスへの効果. 鉄と鋼, 1986, 72: 196
- 5 中島英雄. 连铸铸型内溶钢流动制御による铸片品质の改善. 材料とプロセス, 1989, 2: 1257
- 6 毛斌, 邢文彬等. 结晶器电磁制动的实验研究. 见: 第四届连铸铸钢学术会议论文选. 桂林, 1990. 189
- 7 Suhas V Patankar. Computation of Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill, 1980
- 8 Sumio KOBAYASHI and Susumu ISHIMURA. Analysis of turbulent flow field induced by rotating electromagnetic field in round billets. *Transactions ISIJ*, 1988, 28: 754~760

## BRAKING EFFECT OF A STATIC MAGNETIC FIELD ON LIQUID METAL FLOW IN A SLAB MOLD

Rong Sheng

(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract** Mathematical model on two-dimensional liquid metal flow in a casting slab mold under a static magnetic field is presented, and the effect of the static magnetic field on the liquid metal flow is studied by means of numerical analysis. Computational results show that the velocity of the strand of liquid metal flow and the strength of the reverse flow to the meniscus are reduced by the static magnetic field, and that the braking effect of the magnetic field on the strand of liquid metal flow becomes stronger with the increasing of Hartmann number or the decreasing of Reynolds number.

**Key words** liquid metal, electromagnetic braking, casting slab mold